

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Modernizace laboratorního modelu kuličky na plošině
Upgrade of Ball and Plate Laboratory Model

2018/2019

Martin Vybíral

Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Vybíral**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2612R041 Řídicí a informační systémy
Téma: **Modernizace laboratorního modelu kuličky na plošině**
Upgrade of Ball and Plate Laboratory Model
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Seznámení se s laboratorním modelem kuličky na ploše Humusoft CE 151.
2. Seznámení se s řídicím systémem REX.
3. Analýza algoritmu pro detekci polohy kuličky na ploše a jeho implementace do řídicího systému REX.
4. Úprava laboratorního modelu kuličky na ploše za účelem připojení vstupně-výstupních signálů modelu k systému REX.
5. Tvorba vizualizace k modelu kuličky na ploše v systému REX.
6. Testování laboratorního modelu.
7. Zhodnocení výsledků a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] NOSKIEVIČ, Petr. *Modelování a identifikace systémů*. Ostrava: Montanex, 1999. 276 s. ISBN 80-722-5030-2.
- [2] VOJTÍŠEK, Rudolf. *Realizace vzdáleně řízené úlohy určené pro virtuální laboratoř založené na moderních algoritmech řízení a technologii HTML5*. Ostrava, 2013. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství.
- [3] ŠONKA, Milan a Václav HLAVÁČ. *Počítačové vidění*. Praha: Grada, 1992. Nestůjte za dveřmi. ISBN 80-85424-67-3.
- [4] Štolfa, Michal. *Návrh a realizace vybraných algoritmů řízení pro laboratorní model kulička na ploše*. Ostrava, 2005. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní.
- [5] HUMUSOFT s.r.o. *CE 151 Ball and Plate Apparatus. Technical manual*. Praha: Humusoft s.r.o., 2006.
- [6] HUMUSOFT s.r.o. *CE 151 Ball and Plate Apparatus. Educational manual*. Praha: Humusoft s.r.o., 2006.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Pieš, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019

doc. Ing. Jiří Kozíorek, Ph.D.
vedoucí katedry

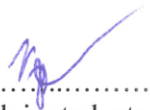


prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 30. dubna 2019


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce, panu Ing. Martinovi Piešovi, Ph.D., za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá analýzou laboratorního modelu Humusoft CE-151, jeho uvedením do funkčního stavu a modernizací vnitřní elektroniky. Model bude udržovat kuličku na zadané pozici pomocí řídicího systému. Pozici bude možné zadat uživatelem a kdykoli měnit z uživatelského rozhraní RexHMI. Dále práce pojednává o řídicím systému REXYGEN, jeho využití a aplikaci. Demoverze REXYGENU běží na Raspberry Pi a implementovaný algoritmus řídí pohyb kuličky po plošině. Sledování polohy kuličky je zajištěno kamerou přes Raspberry Pi a vyhodnocení snímků z kamery je zajištěno analyzovaným algoritmem, který běží jako samostatný program na Raspberry Pi. K vyhodnocení jsou použity knihovny OpenCV.

Modernizace modelu spočívá ve dvou změnách, první je rozhraní mezi Rexduinoem a drivery, druhou změnou je přidání inklinometru a zahrnutí dat z inklinometru do řídicího systému.

Klíčová slova

Rexygen; Rexcontrol; Rexduino; RexHMI; Arduino; Humusoft; Vizualizace;

Abstract

The bachelor thesis deals with the analysis of the laboratory model Humusoft CE-151, its putting into working order and modernization of internal electronics. The model will keep the ball at the specified position using the control system. The position can be entered by the user and can be changed at any time from the RexHMI user interface. The thesis deals with usage of REXYGEN control system and its practical application. The REXYGEN demo runs on Raspberry Pi and the implemented algorithm controls the ball's motion on the platform. The motion of the ball is detected by the camera via Raspberry Pi. The evaluation of images is ensured by the algorithm that runs as a standalone program on Raspberry Pi which use OpenCV libraries for motion detection.

The modernization of the model consists of two changes, the first is the interface between Rexduino and drivers, the second change is the addition of an inclinometer and the inclusion of data from the inclinometer to the control system.

Keywords

Rexygen; Rexcontrol; Rexduino; RexHMI; Arduino; Humusoft; Visualization;

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	- 9 -
Seznam obrázků	- 10 -
Seznam tabulek	- 11 -
Úvod.....	- 12 -
1 Laboratorní model Kulička na plošině	- 13 -
1.1 Konstrukce modelu	- 13 -
1.2 Matematický popis modelu	- 15 -
2 Řídicí systém REXYGEN	- 17 -
2.1 Raspberry Pi	- 17 -
2.1.1 Připojení k RPi	- 18 -
2.2 Aplikace REXU.....	- 19 -
2.2.1 RexDraw.....	- 19 -
2.2.2 RexComp.....	- 20 -
2.2.3 RexCore.....	- 20 -
2.2.4 RexView.....	- 20 -
2.3 Arduino	- 20 -
2.4 REXduino.....	- 21 -
3 Obnovení předešlého zapojení	- 22 -
3.1 Terminál RPi	- 22 -
3.1.1 Vzdálené připojení k terminálu	- 22 -
3.1.2 Obsluha terminálu	- 23 -
3.2 Instalace kamery.....	- 24 -
3.2.1 Detekce polohy kuličky	- 24 -
3.3 Instalace RexCore na RPi.....	- 25 -
3.4 HW struktura	- 25 -
3.4.1 Interface.....	- 26 -
3.4.2 Zapojení driveru	- 27 -
3.4.3 Regulační smyčka modelu.....	- 28 -
4 Inovace modelu	- 29 -
4.1 Nový interface	- 30 -

4.1.1	Stabilizátor napětí.....	- 31 -
4.1.2	U-F převodník	- 31 -
4.1.3	Návrh DPS a zapojení konektorů	- 32 -
4.1.4	Výroba DPS.....	- 32 -
4.2	Řídicí algoritmus a implementace v systému REX.....	- 33 -
4.2.1	Hlavní smyčka	- 34 -
4.2.2	Rychlá smyčka	- 35 -
4.2.3	Hazard switch	- 35 -
4.2.4	Čtení dat z inklinometru	- 36 -
5	Vizualizace	- 37 -
6	Testování	- 40 -
	Závěr	- 42 -
	Použitá literatura	- 43 -
	Seznam příloh.....	- 45 -

Seznam použitých symbolů a zkratek

Zkratka	Význam
CSS	Cascading Style Sheets
DPS	Deska plošných spojů
HMI	Human-machine interface
HTML	Hypertext Markup Language
HW	Hardware
OS	Operační systém
PNM	Pulse number modulation
PWM	Pulse-width modulation
REX	Rexygen
RPi	Raspberry Pi
RT	Real-time
SSH	Secure Shell - komunikační protokol

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1 - Laboratorní model Kulička na plošině</i>	- 13 -
<i>Obrázek 2 - Definice os pohybu a náklonu</i>	- 14 -
<i>Obrázek 3 - Schéma modelu [3]</i>	- 16 -
<i>Obrázek 4 - Všestrannost systému REX [1]</i>	- 17 -
<i>Obrázek 5 - Raspberry Pi v.2</i>	- 18 -
<i>Obrázek 6 - Blokové schéma REXU [2]</i>	- 19 -
<i>Obrázek 7 - Arduino UNO</i>	- 21 -
<i>Obrázek 8 - Blokové schéma</i>	- 21 -
<i>Obrázek 9 - Nastavení PuTTY</i>	- 22 -
<i>Obrázek 10 - Výstup detekce objektu (dva objekty)</i>	- 25 -
<i>Obrázek 11 - Blokové schéma zapojení</i>	- 26 -
<i>Obrázek 12 - PNM modulace [5]</i>	- 26 -
<i>Obrázek 13 - Schéma zapojení PNM</i>	- 27 -
<i>Obrázek 14 - Původní interface</i>	- 27 -
<i>Obrázek 15 - Schéma zapojení driveru [4]</i>	- 28 -
<i>Obrázek 16 - Řízení soustavy</i>	- 28 -
<i>Obrázek 17 - Blokové schéma nové HW struktury modelu</i>	- 29 -
<i>Obrázek 18 - Umístění inklinometru</i>	- 29 -
<i>Obrázek 19 - Převodní charakteristika inklinometru [15]</i>	- 30 -
<i>Obrázek 20 - Nové zapojení HW</i>	- 30 -
<i>Obrázek 21 - Schéma zapojení stabilizátoru</i>	- 31 -
<i>Obrázek 22 - Schéma zapojení U-F převodníku na jedné ose</i>	- 31 -
<i>Obrázek 23 - Zapojení konektorů</i>	- 32 -
<i>Obrázek 24 - Arduino shield</i>	- 32 -
<i>Obrázek 25 - Řízení soustavy</i>	- 33 -
<i>Obrázek 26 - Exekutiva programu v REXU</i>	- 33 -
<i>Obrázek 27 - Implementace regulace hlavní smyčky (obě osy)</i>	- 34 -
<i>Obrázek 28 - Čtení dat z paměti RAM</i>	- 35 -
<i>Obrázek 29 - Implementace regulace rychlé smyčky (jedna osa)</i>	- 35 -
<i>Obrázek 30 - Vnitřní zapojení bloku HAZARD_SW</i>	- 35 -
<i>Obrázek 31 - Zapojení bloku HAZARD_SW (osa X)</i>	- 36 -
<i>Obrázek 32 - Převod napětí na úhel v bloku AXIS_CONVERT</i>	- 36 -
<i>Obrázek 33 - Úvodní stránka</i>	- 37 -
<i>Obrázek 34 - Manuální mód</i>	- 38 -
<i>Obrázek 35 - Nastavení regulátorů</i>	- 39 -
<i>Obrázek 36 - Testování manuálního módu</i>	- 40 -
<i>Obrázek 37 - Průběhy výstupu inklinometru před a po filtraci</i>	- 41 -
<i>Obrázek 38 - Testování automatického módu</i>	- 41 -

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 - Běžné příkazy</i>	<i>- 23 -</i>
<i>Tabulka 2 - Nastavení Exekutivy</i>	<i>- 34 -</i>

Úvod

Cílem práce bylo uvést do provozu laboratorní model Humosft CE-151 a inovovat jej. Model byl několikrát upravován a již neobsahoval původní komponenty, model postrádá původní kameru a řídicí systém. Výrobce uvádí možnost řízení modelu přímo z počítače programem Matlab. Tento model však postrádá elektroniku, která by to umožnila. Předěšlé řešení obsahuje desku, která slouží jako interface mezi drivery motorů a systémem Rexduino. Motory tak mohou být ovládány PWM signálem z Rexduina. Rexduino spojuje vlastnosti Arduina a Raspberry Pi, je tak na něj možno napojit celý model.

V práci se probírá obnovení původního zapojení na bázi řídicího systému REXYGEN. V prvních kapitolách je teoretické seznámení s modelem a použitými komponenty. Konkrétně se jedná o prvky Rexduina. Dále je probrána HW struktura původního zapojení modelu a analyzován program na detekci polohy kuličky. Dalším bodem práce je inovace modelu, která proběhla ve dvou směrech, přidáním inklinometru a výměnou rozhraní mezi Rexduinem a drivery. Nové rozhraní obsahuje U-F převodník. Inovace zanesla změny do řízení modelu, které tak bylo rozděleno do dvou smyček. V dalších řádcích je shrnuta vizualizace vytvořená přes RexHMI Designer, kterou lze vzdáleně ovládat model z internetového prohlížeče. Závěrem je celkový souhrn práce.

1 Laboratorní model Kulička na plošině

Jedná se o laboratorní model Humusft CE-151, který je navržen pro učení strojového vidění a aplikaci řídicích systémů. Model náklonem plošiny přesouvá kuličku a udržuje ji na zadaných souřadnicích, aktuální poloha kuličky je sledována kamerou. Model byl v nefunkčním stavu, chyběly důležité HW komponenty a hlavní řídicí systém.



Obrázek 1 - Laboratorní model Kulička na plošině

1.1 Konstrukce modelu

Hlavní část modelu se skládá z výkyvné plošiny o velikosti 40x40cm, která je ve svém středu připevněna ke kloubu. Kloub umožňuje náklon plošiny ve všech směrech. Maximální výchylka náklonu je limitována spínačem. Náklon desky je zajištěn dvěma navzájem kolmými soustavami lanek a krokových motorů. V modelu je použit konkrétní typ motoru SLO-SYN M061-LE08, pro každý směr jedno lanko i motor. Motory jsou připojeny k driveru SLO-SYN 230T. [4]

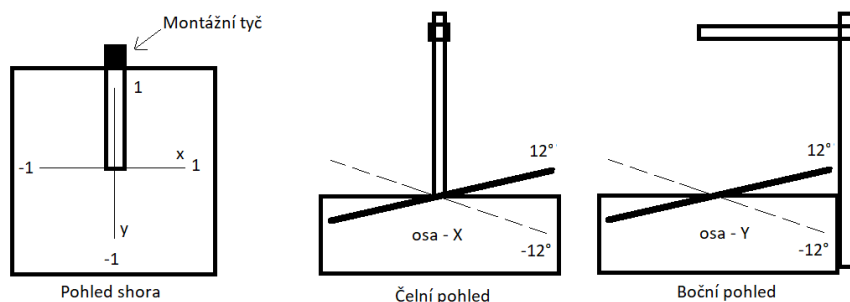
Driver má několik vstupů:

- PU
 - Po přivedení log.1 provede driver otočení motoru o 1 krok. Driver reaguje na obdélníkový signál o frekvenci maximálně 15kHz, konkrétně na náběžnou hranu.
- CW/CCW
 - Určuje směr rotace motoru, po přivedení logické 1, nebo nezapojeném konektoru se motor otáčí při čelním pohledu pravotočivě. Při uzemnění kontaktu dojde ke změně rotace motoru.

- H/F
 - Při uzemnění pinu motor provede pouze polovinu kroku, jinak provede na jeden puls jeden krok. Použitím této funkce motor ztratí až 30 % momentové síly.
- AWO
 - Funkce pro odbrzdění motoru, přivedením log. 0 motor přestává být držen magnetickou silou na aktuální pozici.
- REDUCE CURRENT
 - Zapnutí režimu omezené spotřeby. Nastavením tohoto pinu dojde k omezení proudu do motoru na 1 A.
- LOGIC COM.
 - Referenční napětí pro log. 0 driveru.
- OPTO SUPPLY OUT
 - Výstup vlastního zdroje driveru.
- OPTO SUPPLY IN
 - Napájení vnitřních obvodů přes optické oddělení obvodů.

Z hlavní části modelu je na zadní část přišroubovaná tyč, která slouží pro umístění kamery. Celý model je napájen ze sítě externím zdrojem.

Při čelním pohledu na model jsou definovány dvě osy pohybu a náklonu (Obrázek 2). Nulový bod os je definován uprostřed plošiny, kde se nachází kloub. Pro pohyb kuličky ve směru dopředu čili blíže k tyči s kamerou se jedná o pohyb po ose Y, kdy souřadnice pozice kuličky narůstá. Osa X je definována jako kolmá k ose Y a nárůst souřadnice pozice kuličky se očekává, při jejím pohybu doprava.



Obrázek 2 - Definice os pohybu a náklonu

1.2 Matematický popis modelu

Kulička na plošině je neautonomní systém, který lze popsat pomocí dvou diferenciálních rovnic:

$$\left(m + \frac{J_0}{R^2}\right) \ddot{x} - mg \sin(\alpha) - m(\ddot{\alpha}^2 x + \dot{\alpha} \dot{\beta} y) + Rm \ddot{\alpha} = 0 \quad (1.1)$$

$$\left(m + \frac{J_0}{R^2}\right) \ddot{y} - mg \sin(\beta) - m(\dot{\beta}^2 y + \dot{\alpha} \dot{\beta} x) + Rm \ddot{\beta} = 0 \quad (1.2)$$

[18]

S ohledem na minimální vliv vzájemných složek na polohu kuličky, lze zanedbat vzájemné vazby mezi osami, popis modelu zjednodušit a popsat následovně:

$$\left(m + \frac{J_0}{R^2}\right) \ddot{x} = mg \sin(\alpha) \quad (1.3)$$

$$\left(m + \frac{J_0}{R^2}\right) \ddot{y} = mg \sin(\beta) \quad (1.4)$$

[18]

Pokud je náklon plošiny omezený, funkci $y = \sin(x)$ je možno linearizovat funkcí $y = x$, při zanesení nízké relativní chyby do výpočtu.

Pak je linearizovaný přenos systému kuličky na plošině při nulových počátečních podmínkách následující:

$$F(p) = \frac{mg}{p^2 \left(m + \frac{J_0}{R^2}\right)} \quad (1.5)$$

[18]

Parametry uvedených rovnic:

m – hmotnost kuličky

J_0 – moment setrvačnosti kuličky

R – poloměr kuličky

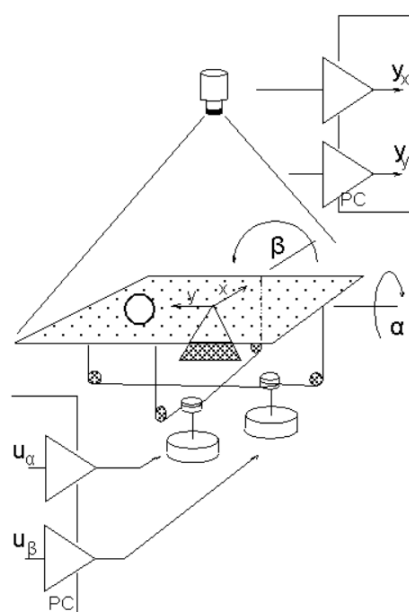
α – úhel náklonu vztažený k ose x

β – úhel náklonu vztažený k ose y

x – pozice kuličky na ose x

y – pozice kuličky na ose y

g – gravitační zrychlení

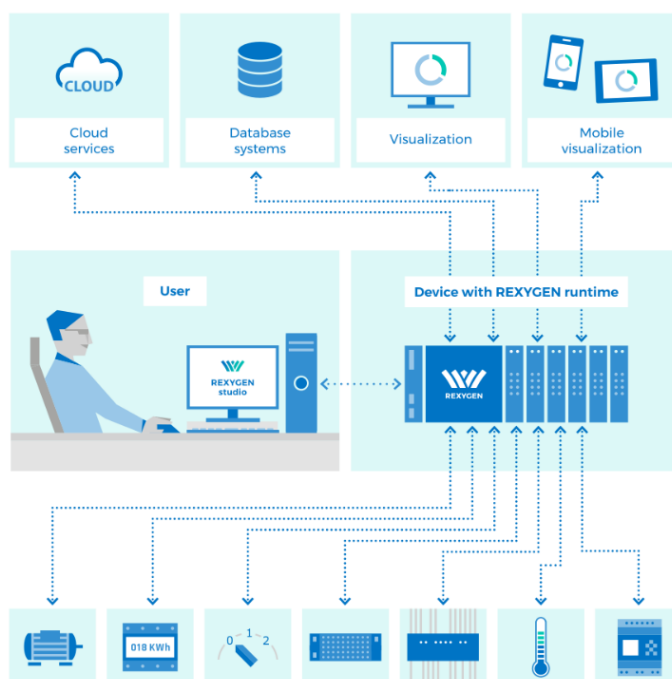


Obrázek 3 - Schéma modelu [3]

2 Řídicí systém REXYGEN

Je systém vyvinutý firmou REX Controls s.r.o. pro aplikaci RT řídicích systémů. Využívá se v automatizace, měřeních nebo i regulacích. Technologie Rexygen se stále vyvíjí, je cílena pro využití ve vývoji prototypových zařízení, nebo výzkumných centrech. Umožňuje propojení s jinými vývojovými programy jako je například Matlab.

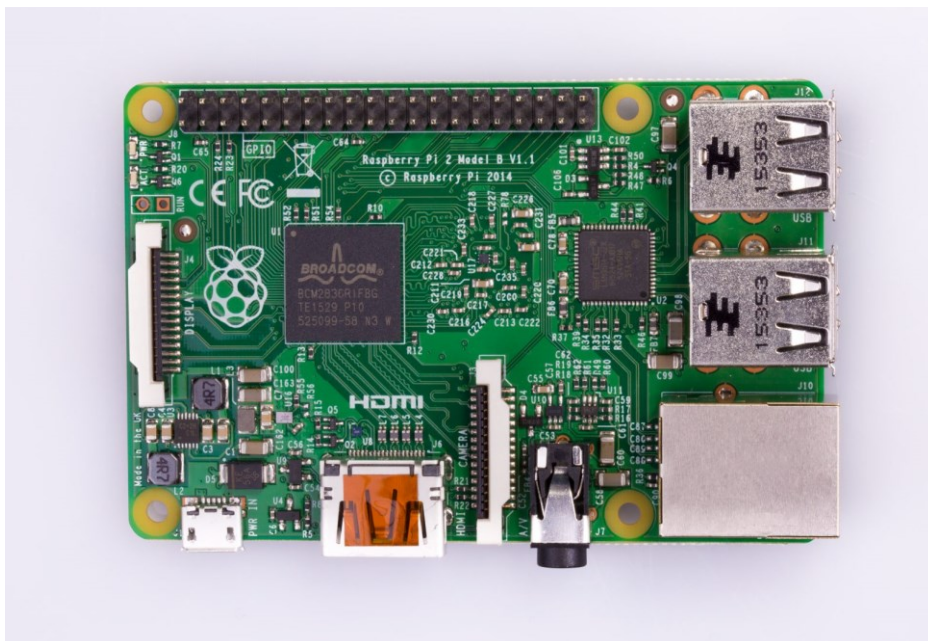
REX je multiplatformní s plnou podporou běžných operačních systémů například Windows, Linux, PharLap ETS, díky tomu lze aplikovat na různé průmyslové počítače. Firma nabízí plnou podporu při potížích s jejich SW, pro méně náročné aplikace umožňuje použít konkrétní podporované platformy jako jsou Pigeon PLC, UniPi Lite, Wago PFC100/PFC200, Raspberry Pi a další. Použití některých těchto zařízení může značně snížit náklady při vývoji řídicího systému. [1]



Obrázek 4 - Všestrannost systému REX [1]

2.1 Raspberry Pi

Jedná se o malý jednodeskový počítač o rozměrech desky přibližně 8,5cm na 5,5cm. První dostupná verze byla vyvinuta roku 2012 britskou nadací Raspberry Pi Foundation. Účelem nadace bylo seznámit lidi s programováním. Na trhu se tak objevil cenově dostupný produkt, podporující tvorbu vlastních aplikací uživatelem. Dnes už má Raspberry Pi (dále uvedeno jako RPi) několik novějších verzí, pro instalaci REXU je použito RPi verze 2. [13, 14]



Obrázek 5 - Raspberry Pi v.2

Na RPi běží operační systém Raspbian, který lze bezplatně pořídit. Raspbian je odvozen z operačního systému Debian distribuce GNU/Linux a je speciálně navržen pro RPi. RPi má podporu i jiných OS, avšak pro aplikaci REXU postačuje základní systém. OS se neinstaluje přímo na RPi, nýbrž na externí paměťovou kartu, která se připojí do paměťového slotu. Vzhledem k rozměrům platformy není místo na větší Harddisk. RPi tedy nemá vlastní datovou paměť, disponuje pouze rychlou pamětí pro potřeby procesoru. [13, 14]

OS Debian má širokou podporu uživatelů se zájmem o programování a programy na tento systém se stále vyvíjejí, z tohoto důvodu má OS Raspbian již s jeho příchodem velkou komunitu potenciálních uživatelů a mnoho funkcí. [13, 14]

K Raspberry Pi lze připojit HW doplňky, podporuje připojení USB zařízení, monitoru přes HDMI, má vlastní konektory DSI a CSI pro připojení kamery a displeje. K portu CSI je pro potřebu snímání polohy kuličky připojena kamera RPi Camera Rev 1.3, jedná se o konkrétní kameru určenou pro připojení k RPi. [13, 14]

2.1.1 Připojení k RPi

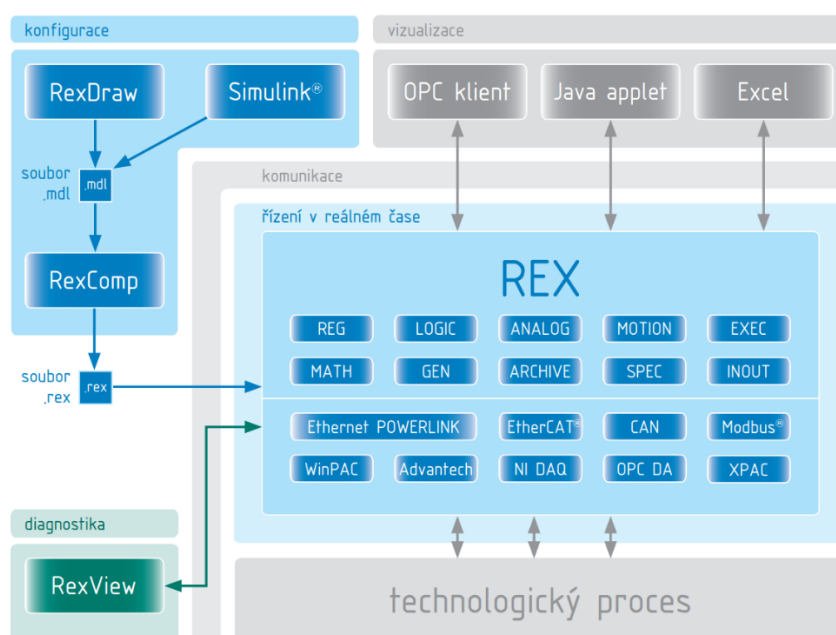
RPi v2 obsahuje v základní výbavě ethernetový konektor a je možné jej připojit k síti přes TCP/IP protokol. RPi po instalaci OS může mít zakázanou možnost vzdáleného přístupu k terminálu, tento fakt je nutno zohlednit a RPi připojit k monitoru, v nastavení poté povolit komunikaci přes SSH.

2.2 Aplikace REXU

Systém se skládá z několika částí, kterými umožňuje vytvořit, otestovat a analyzovat chod aplikace. Hlavními částmi jsou:

- RexDraw
- RexComp
- RexCore
- RexView

REX systém dovoluje (například operátorovi) ovládat a sledovat dění systému přes uživatelské rozhraní. K jeho vytvoření existuje nástroj RexHMI Designer. [1, 2]



Obrázek 6 - Blokové schéma REXU [2]

2.2.1 RexDraw

Je součástí vývojového prostředí REXYGEN Studio. Umožňuje grafický návrh řídicího algoritmu, i pro méně zkušené programátory je snadno pochopitelný. Program se skládá z funkčních bloků a jejich propojení drátem představuje proměnné. Akce propojení bloků mezi sebou není zcela intuitivní a někdy vyžaduje značné úsilí. RexDraw nabízí velkou sadu knihoven s již hotovými funkčními bloky. Některé knihovny je možno dokoupit, nebo si také vytvářet vlastní s vlastními funkcemi. Vytvořený algoritmus lze uložit jako soubor formátu ".mdl". [1, 2]

2.2.2 RexComp

Slouží pro kompilaci souborů formátu "mdl" na soubor spustitelný systémem REX, tedy soubor formátu "rex". Kompilátor není striktně vázán na soubory vytvořené v RexDraw, umožňuje kompilaci všech souborů typu mdl, které mohou být vytvořeny i jinými vývojářskými aplikacemi jako je například Matlab-Simulink. Kompilace se spouští přes REXYGEN Studio, výsledkem je binární kód, který můžeme nahrát na platformu. [1, 2]

2.2.3 RexCore

Program na platformu je možné nahrát přímo z vývojového prostředí. Jádro systému, běží na platformě a vykonává programové instrukce v režimu preemptivního multitaskingu. Procesorový čas je úloze přidělován operačním systémem podle priority instrukcí. V závislosti na využití procesoru je tedy možné spouštět na platformě i další úlohy. [1, 2]

2.2.4 RexView

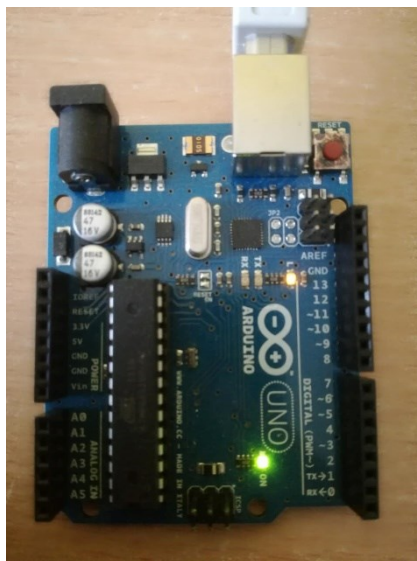
Část programu určená k diagnostice a sledování aktuálního dění v jádře systému REX. Poskytuje detailní informace o všech subsystémech RexCore, tím se stává nepostradatelným nástrojem při ladění programu a jeho vývoji. Připojení RexView k platformě a RexCore je přes TCP/IP protokol, je tedy možné sledovat dění i z dálky. [1, 2]

2.3 Arduino

Arduino je zařízení založené na mikroprocesorech firmy Atmel. Od jeho vydání se rychle rozšířilo všude do světa a stalo se velmi oblíbené mezi kutily a lidmi se zájmem o programování mikroprocesorů. Programování probíhá z vývojového prostředí Arduino IDE, pomocí jazyku Wiring, který je velmi podobný jazyku C. Arduino již má vyřešeno hodně funkcí, které pracují s mikroprocesorem, tak programátorovi usnadňuje práci. Programování Arduina se jeví daleko jednodušší než programování procesoru samotného a pro prototypové účely je vhodným nástrojem. Projekt Arduino nabízí volně dostupné dokumenty se specifikací jednotlivých desek a typů. Nejrozšířenějším typem je Arduino UNO. Na tento model existuje velké množství již hotových aplikací a HW doplňků. [11]

Arduino UNO rozšiřuje samotný mikroprocesor o nezbytný HW, který je vyžadován pro bezproblémový chod mikroprocesoru. DPS obsahuje stabilizovaný zdroj napětí, krystal pro generování taktu mikroprocesoru, resetovací tlačítko, kontrolky indikující stav Arduina a sadu pinů pro připojení periférií. Pro programování z PC se na desce vyskytuje USB konektor a HW prvek "Debugger", tím je usnadněno nahrávání kódu z Arduino IDE bez potřeby dalšího HW nástroje. [11]

Složitější periferie zastávající nějakou HW funkci, například ovládání motoru, nebo modul pro bezdrátový přenos se připojují na Arduino jako tzv. "Shieldy". Shield je DPS obsahující přídatný HW prvek, avšak rozložení pinů na desce odpovídá rozložení pinů na Arduinu, tak je možné komponenty snadno propojit bez nutnosti propojovacích drátů, zapojení je rychle proveditelné, přehledné a plně funkční.



Obrázek 7 - Arduino UNO

2.4 REXduino

RPi s nainstalovaným REX systémem může komunikovat s Arduinem přes SW zvaný REXduino. Toto spojení zvyšuje výpočetní výkon a přidává k RPi další funkce. Na Arduino Uno je přes Arduino IDE nahrán soubor, který zajistí komunikaci mezi zařízeními přes USB. Jedná se o vztah MASTER-SLAVE, kdy Arduino přijímá příkazy od RPi. Arduino je následně použito v prostředí RexDraw jako funkční blok. [12]



Obrázek 8 - Blokové schéma

3 Obnovení předešlého zapojení

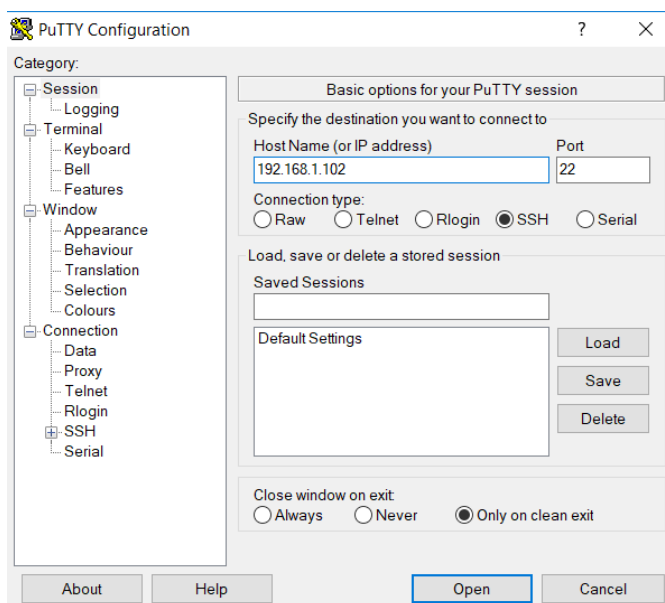
Předešlé zapojení obsahovalo řídicí prvky, které bylo nutno přidat a nově nakonfigurovat. Byla provedena nezbytná instalace SW balíčků na platformy RPi a Arduino UNO, jejich nastavení a přidání do řízení modelu.

3.1 Terminál RPi

Hlavní ovládací prvek OS Raspbian je terminál, ten obsahuje příkazový řádek pro psaní instrukcí. Konkrétně systém na použitém RPi obsahuje i GUI, takže některé práce se soubory lze provést jako při běžné práci s PC a systém je tak i pro lidi začínající s platformou přívětivý. Práce v terminálu je však pro zkušenou osobu daleko rychlejší.

3.1.1 Vzdálené připojení k terminálu

K RPi terminálu se lze z PC připojit skrze program PuTTY, který využívá TCP/IP a SSH zabezpečeného připojení. Aby bylo připojení možné, oba přístroje musí být na stejné síti, poté stačí do programu zadat IP adresu RPi a potvrdit tlačítkem Open. Po připojení se objeví terminál a volba přihlásit se. Přihlašovací údaje vychází z OS Raspbian.



Obrázek 9 - Nastavení PuTTY

Přihlášení k RPi:

Uživatel: pi
Heslo: raspberry

Zobrazení grafických souborů a videí je provedeno pomocí programu Xming, ten je spuštěn a běží na pozadí počítače. Aby bylo zobrazení možné, musí být v nastavení PuTTY povolena možnost "Enable X11 forwarding". Dále je zobrazení spuštěno příkazem v terminálu. [6]

3.1.2 Obsluha terminálu

Do terminálu se vepisují příkazy k vykonání. Příkazy jsou zkratkami anglických slov, které většinou vystihují danou operaci. Příkazy se skládají z operace a parametru. Parametrem může být například cesta k souboru, nebo název aplikace. Některé operace nepotřebují zadat parametr, pak se vykonají podle defaultního nastavení. U některých příkazů je nutno začít příkaz výrazem "sudo" zkratka výrazu "SUPER USER DO", přidává příkazu oprávnění administrátora.

Rutinní příkazy:

`sudo apt-get update`

- Proveďte aktualizaci seznamu dostupných verzí SW balíčků.

`sudo apt-get upgrade`

- Proveďte aktualizaci nainstalovaných SW pokud jsou dostupné.

Tyto příkazy jsou nezbytné k udržení aktuálního systému a před instalací jakéhokoli dalšího programu je vyžadováno jejich použití. [8]

Tabulka 1 - Běžné příkazy

<code>cd</code>	otevření <code>"/home/pi"</code> adresáře
<code>cd -</code>	otevření nadřazeného adresáře
<code>cd python_test</code>	otevře adresář <code>"python_test"</code>
<code>ls</code>	vypíše seznam souborů z aktuálního adresáře
<code>mkdir python_test</code>	vytvoří složku <code>"python_test"</code>
<code>pwd</code>	vypíše cestu aktuálního adresáře
<code>sudo</code>	dává příkazu oprávnění administrátora

3.2 Instalace kamery

Konstrukce kamery je polohovatelná a je možné ji nastavit dle potřeby kamery. Použitá kamera je umístěna ve správné poloze, pokud snímá celou plošinu bez přesahů do okolí a natočení kamery odpovídá osám x,y.

Použitá kamera je přímo kompatibilní s RPi, její připojení je provedeno do speciálního portu umístěného na desce RPi. Ovladače pro zacházení s kamerou v rámci RPi jsou již zahrnuty v předinstalovaném OS. Spuštění kamery probíhá přímo v detekčního kódu spuštěném na RPi.

3.2.1 Detekce polohy kuličky

Detekce kuličky se děje na černém pozadí. Kuličku představuje bílý míček, který má na daném pozadí vysoký kontrast. Tato fakta umožňují vytvořit jednodušší algoritmus s použitím méně filtračních funkcí. Účelem detekce je získat aktuální souřadnice kuličky a poskytnout je řídicímu SW.

Algoritmus se skládá z několika kroků, je psaný v jazyku Python a využívá knihoven souboru OpenCV a tedy již vytvořených funkcí k úpravě obrazu a detekci.

Nejprve se nastaví kamera a zapne snímání kamery.

```
camera = PiCamera()
camera.resolution = (160, 120)
camera.framerate = 35
rawCapture = PiRGBArray(camera, size=(160, 120))
```

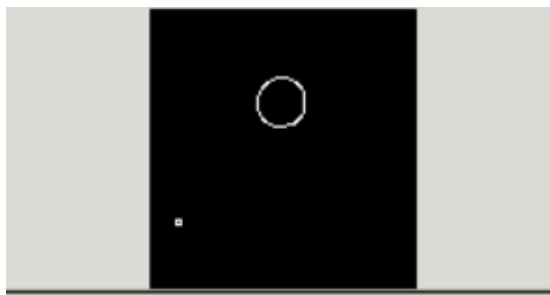
Program poté běží ve smyčce a analyzuje aktuálně dostupný snímek z kamery.

Formátování snímku:

- převedení RGB snímku na černobílý
- vyhlazení/průměrování snímku
- převedení snímku na binární, snímek rozlišuje pouze dvě barvy - černou nebo bílou
- převedení snímku na snímek, který zobrazuje pouze obrysy

Detekce kuličky:

- detekce všech ucelených obrysů na snímku
- definování kružnice opisující tvar obrysu
- zápis souřadnic středu kružnice jako souřadnic kuličky



Obrázek 10 - Výstup detekce objektu (dva objekty)

Zápis souřadnic počítá pouze s jednou kuličkou na snímku, při detekování více objektů se budou souřadnice přepisovat bez rozlišení ke kterému objektu patří. Pro souřadnice bylo alokováno místo v RAM paměti RPi, kde jsou ukládány ve formě textového souboru. Každá souřadnice má vlastní soubor, ve kterém se vyskytuje aktuálně zapsané číslo. [5]

3.3 Instalace RexCore na RPi

K instalaci RexCore je použita sada příkazů, která se vepíše do terminálu RPi. [2]

```
sudo apt update
```

- Aktualizace aplikačních repositářů.

```
sudo apt install git
```

- Instalace GIT.

```
cd
```

- Příkaz k otevření základního adresáře v systému Raspbian.

```
git clone https://github.com/rexcontrols/rex-install-rpi.git --  
branch v2.50
```

- Stažení nejnovější verze instalačního skriptu, adresu je třeba ověřit, jestli je aktuální.

```
cd rex-install-rpi
```

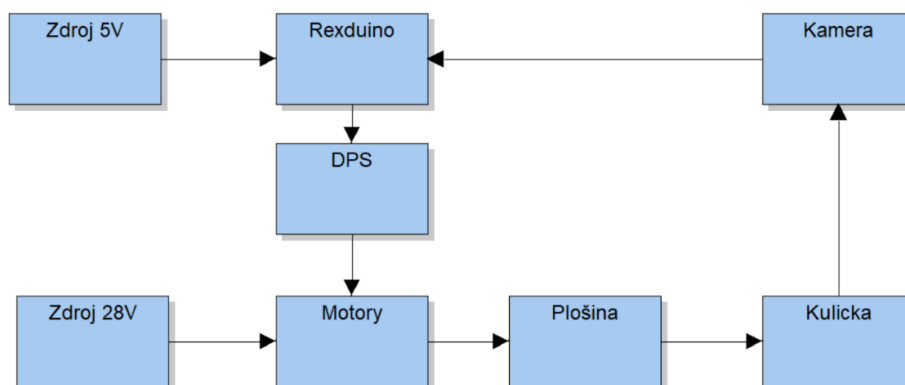
- Otevření složky rex-install-rpi.

```
sudo bash install-rex.sh
```

- Spuštění instalace RexCore pro základní verzi platformy RPi.

3.4 HW struktura

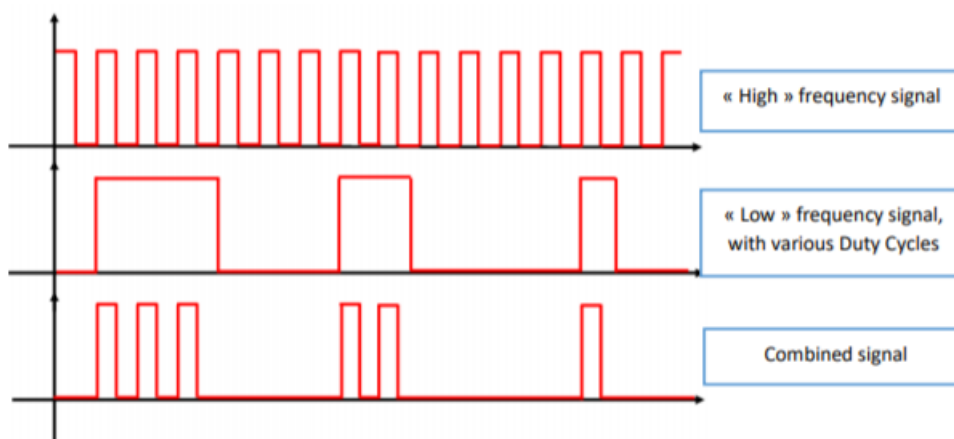
Zařízení obsahuje dva síťové zdroje, jeden pro napájení RPi a druhý pro napájení motoru. Arduino a s ním spojené obvody jsou napájeny přes USB přímo z RPi. Motory jsou ovládány přes drivery, které jsou připojeny k DPS, která slouží jako interface. Tato deska připojuje koncové spínače k Rexduinu a obsahuje přídatný log. obvod pro řízení driveru.



Obrázek 11 - Blokové schéma zapojení

3.4.1 Interface

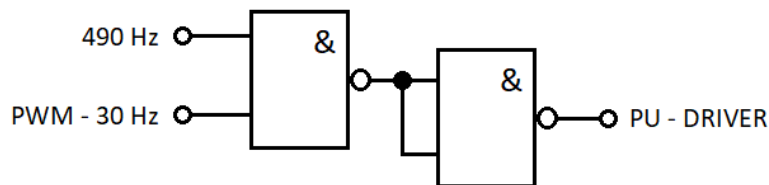
Při detekci náběžné hrany driver provede otočení motoru o jeden krok. Runtime REXU není dostatečně rychlý, aby byly pulzy generovány přímo. Proto je zvolena metoda generování PWM a její výstup je HW převeden na počet pulzů, a tedy výslednou rychlost. Zisk proměnného počtu pulzů je zajištěn PNM modulací, kdy ke generaci je použit log. součin obdélníkového signálu s vyšší frekvencí a proměnného PWM signálu s frekvencí nižší.



Obrázek 12 - PNM modulace [5]

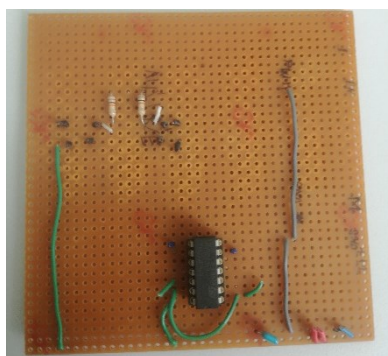
Generování signálu s vyšší frekvencí je zajištěno generováním PWM signálu se střídou 50 % na frekvenci 490 Hz. Generování druhého signálu probíhá při 30Hz. Oba signály jsou generovány Rexduinem, avšak pro změnu časové základny pro generaci PWM je nutno upravit kód nahraný

v Arduinu použitím doplňující funkce v inicializaci. Součin je na doplňujícím HW zajištěn pro každý kanál dvěma hradly NAND. Je použit integrovaný obvod se 4 hradly, který je napájen z Arduina. [5]



Obrázek 13 - Schéma zapojení PNM

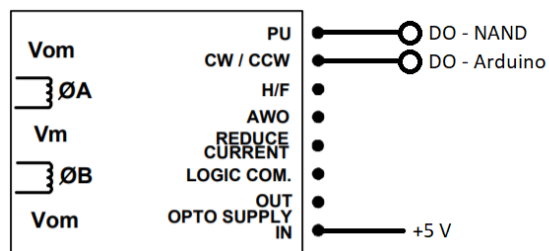
Původní DPS obsahuje také připojení koncových spínačů, pomocí dvou pull-up rezistorů jsou přivedeny hodnoty o limitní pozici na vstupy Arduina.



Obrázek 14 - Původní interface

3.4.2 Zapojení driveru

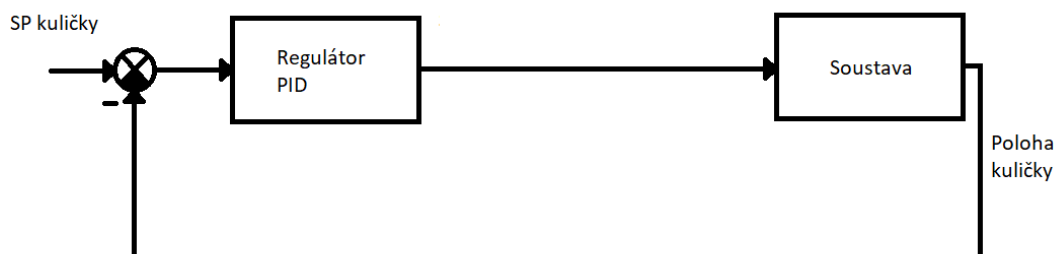
Pro řízení motoru je dostačující zapojení tří vstupů driveru (PU, CW/CCW, OPTO SUPPLY IN). Na vstup OPTO SUPPLY IN je připojena kladná napájecí větev z Arduina o hodnotě napětí 5 V. Zapojením tohoto pinu jsou nastaveny všechny ovládací vstupy driveru do napěťové úrovně log. 1. Log. 0 je na ovládacím pinu nastavena, pokud je ovládací pin uzemněn.



Obrázek 15 - Schéma zapojení driveru [4]

3.4.3 Regulační smyčka modelu

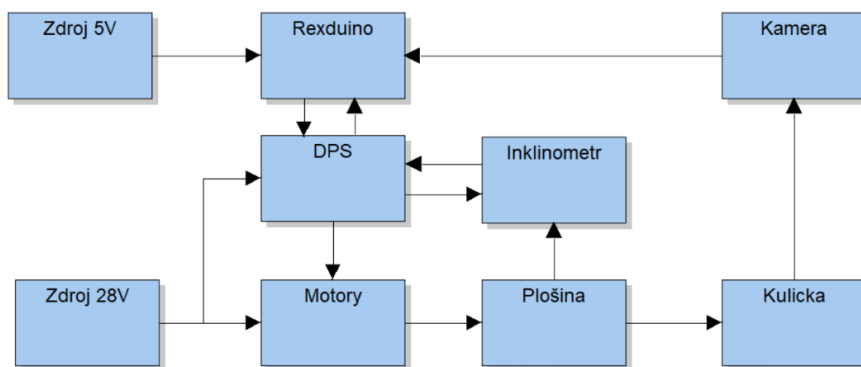
Soustava byla určena pro návrh a testování regulátorů řízených z polohy kuličky. Regulační smyčka pak vypadala následovně (Obrázek 16):



Obrázek 16 - Řízení soustavy

4 Inovace modelu

Změny komponent se projeví na HW zapojení modelu. Přibyla nová komponenta, přidávající modelu možnost sledování aktuální hodnoty náklonu plošiny.



Obrázek 17 - Blokové schéma nové HW struktury modelu

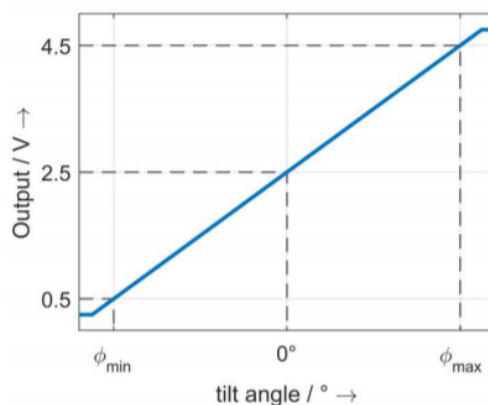
V rámci modernizace modelu byl model doplněn o inklinometr. Hodnota výstupu inklinometru byla zakomponována do řídicího algoritmu. Nově je řízení modelu rozděleno do dvou smyček, kdy rychlá vnitřní smyčka zajišťuje náklon plošiny a hlavní smyčka zadává požadovanou hodnotu náklonu. Měření náklonu probíhá inklinometrem, který je nalepen na spodní straně plošiny.



Obrázek 18 - Umístění inklinometru

Pro sledování hodnoty náklonu byl použit dvouosý inklinometr DOG2 MEMS-Series s označením G-NSDOG2-001. Výstupem inklinometru je hodnota napětí z rozsahu od 0.5

do 4.5 V pro hodnoty náklonu $\pm 25^\circ$. Inklinometr také disponuje širokým rozsahem napájecího napětí od 8 do 30 V. Z převodní charakteristiky je vidět, že se jedná o lineární prvek. [15]

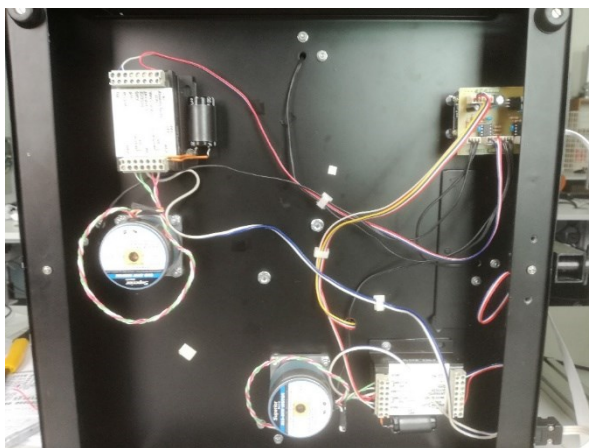


Obrázek 19 - Převodní charakteristika inklinometru [15]

4.1 Nový interface

Další zásadní úpravou modelu, bylo nahrazení původní DPS a jejího způsobu konverze PWM signálu pro ovládání motorů. Nová deska obsahuje integrovaný U-F převodník AD654 s obdélníkovým signálem na výstupu. Za výstup z Arduina je přidán RC článek, kterým je z PWM signálu získána konstantní hodnota napětí. Na desce se nově vyskytuje stabilizovaný zdroj pro napájení inklinometru.

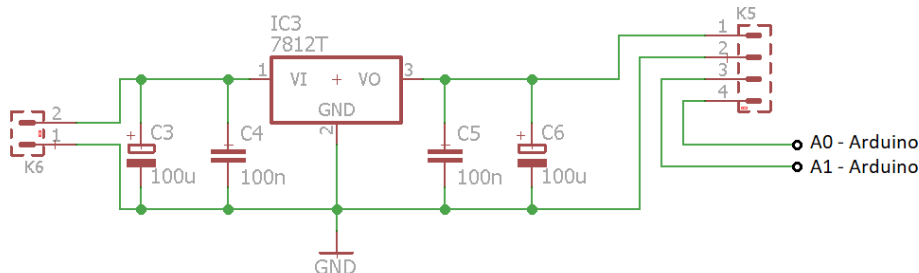
Pro snadnou výměnu DPS bez nutnosti pájení, je nově vnitřní struktura modelu připojena konektory typu "MOLEX". DPS byla navržena, aby ji bylo možno připojit k Arduino UNO pouhým nasazením na připojovací piny. Vznikl tak nový shield pro platformu Arduino.



Obrázek 20 - Nové zapojení HW

4.1.1 Stabilizátor napětí

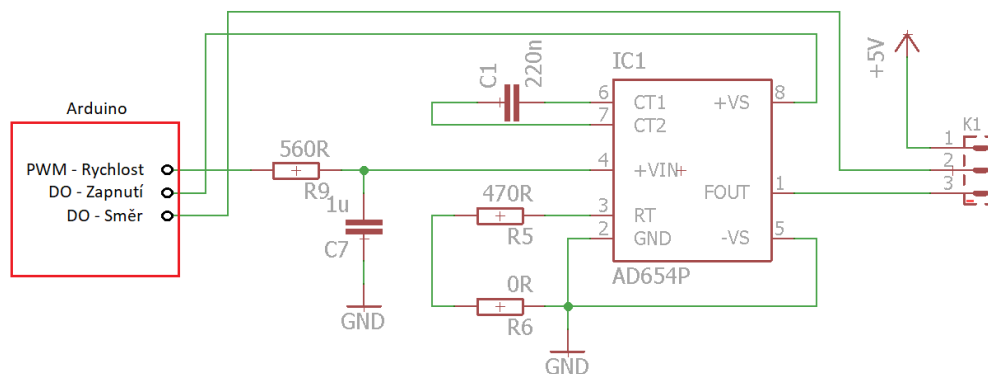
Napájení inklinometru je zajištěno integrovaným stabilizátorem napětí LM7812, který stabilizuje vstupní napětí na 12 V. Maximální hodnota vstupního napětí stabilizátoru je 35 V. Stabilizátor je napájen ze zdroje pro motory, který stanovenou hodnotu nepřekračuje. Zapojení obvodu vyžaduje pouze přidání filtrační kapacity na vstup i výstup. [16]



Obrázek 21 - Schéma zapojení stabilizátoru

4.1.2 U-F převodník

Obvod převádí analogovou hodnotu napětí na proměnný obdélníkový signál. Jedná se o integrovaný obvod s jedním výstupem a několika vstupy. Převodník je částečně nastavitelný volbou regulačních součástek. Časování obvodu nastavuje kondenzátor C1, pro nižší frekvenční pásmo je zvolená kapacita součástky vyšší, než je doporučená hodnota v katalogu výrobce. Linearity součástky je docíleno nastavením řídicího proudu na 1 mA, který se nastavuje hodnotami rezistorů R5, R6. Pro obě osy byly zvoleny stejné hodnoty součástek. Spotřeba převodníku je velmi nízká, výrobce uvádí 2 mA, proto je možné napájet převodník přímo z digitálního výstupu Arduino. [17]

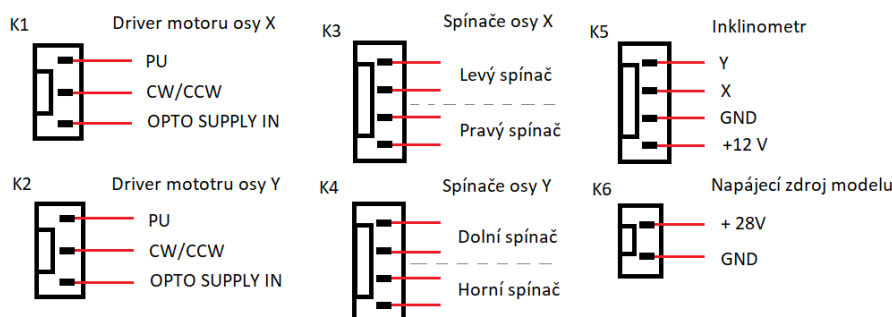


Obrázek 22 - Schéma zapojení U-F převodníku na jedné ose

4.1.3 Návrh DPS a zapojení konektorů

Návrh DPS je proveden v programu Eagle. Při návrhu desky byl kladen důraz na její velikost, přibližně musí odpovídat velikosti Arduino. Na DPS je zvolena dostatečná šířka cest i dielektrika, aby bylo usnadněno leptání a nedošlo k odleptání některé z cest.

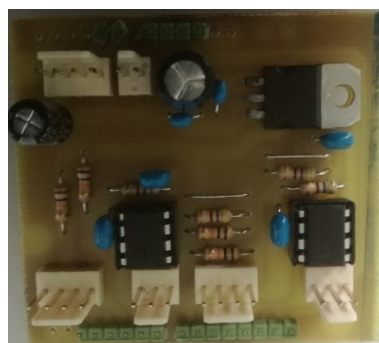
Konektory byly rozděleny podle komponent. Každá komponenta modelu má svůj připojovací konektor. Pro drivery se jedná o konektory K1 a K2. Pro koncové spínače se jedná o konektory K3 a K4. Inklinometr je připojen konektorem K5. Konektorem K6 je k desce připojen napájecí zdroj modelu.



Obrázek 23 - Zapojení konektorů

4.1.4 Výroba DPS

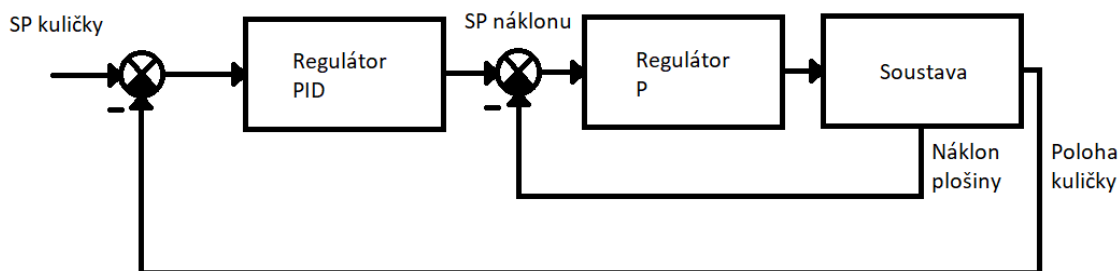
Podle navržené DPS uvedené v příloze (A_DPS), byla vyrobena deska plošného spoje metodou osvitů a leptání. Osvícení probíhalo přes průhlednou fólii, na kterou byl vytištěn návrh plošného spoje. Osvícený plošný spoj byl zbaven nevytvrzeného laku v roztoku uhličitanu sodného a poté leptán v lázni s roztokem persíranu sodného. Po vyleptání byla deska vyjmuta a zkontrolována. Vrstva laku chránící nevyleptanou měď byla sloupána, při ponoření desky do roztoku hydroxidu sodného. Na měděnou vrstvu desky byl nanesen ochranný lak, zamezující znehodnocení mědi. Výsledný plošný spoj byl osazen součástkami a nasazen na Arduino.



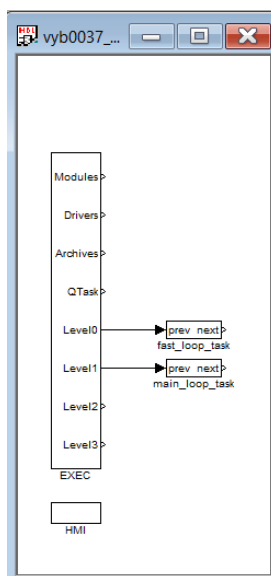
Obrázek 24 - Arduino shield

4.2 Řídicí algoritmus a implementace v systému REX

Nový systém řízení modelu je rozložen do dvou regulačních smyček, rychlé a hlavní smyčky. Hlavní smyčka pracuje s pozicí kuličky, rychlá smyčka s náklonem plošiny. Smyčky jsou rozděleny v REXU do dvou souborů (úloh), které jsou volány exekutivou REXU.



Obrázek 25 - Řízení soustavy



Obrázek 26 - Exekutiva programu v REXU

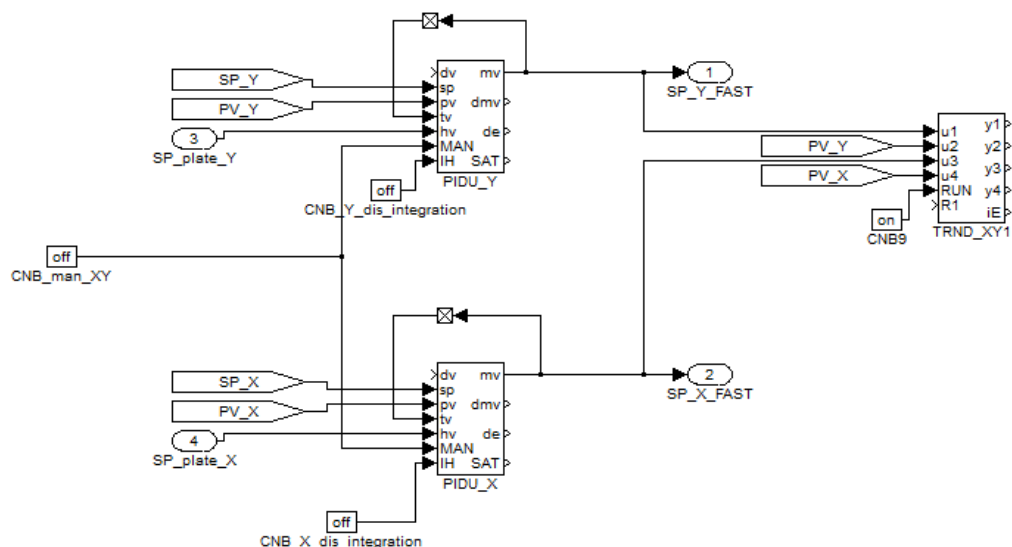
Rychlá smyčka je volána 5krát častěji než hlavní smyčka. Časování exekutivy je popsáno tabulkou (Tabulka 2). Základní perioda řídicího systému je nastavena parametrem „tick“. Perioda volání jednotlivých připojených úloh je násobkem parametru daného Levelu (např. „ntick0“) s periodou parametru „tick“.

Tabulka 2 - Nastavení Exekutivy

Číslo parametru	Parametr	Hodnota parametru	Definice parametru
2	tick	0.025	Základní perioda řídicího systému.
3	ntick0	2	Perioda opakování úlohy připojené na Level 0.
4	ntick1	10	Perioda opakování úlohy připojené na Level 1.

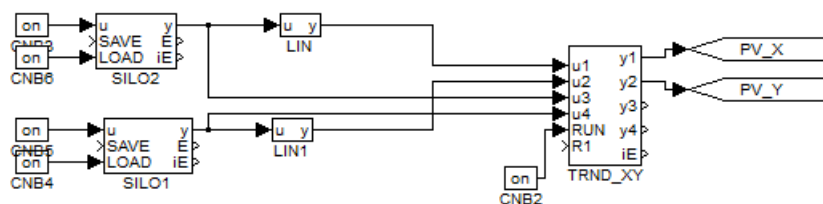
4.2.1 Hlavní smyčka

Regulace polohy kuličky obsahuje PID regulátor s možností nastavení parametrů regulátoru. Výstupem z regulátoru je reakce na rozdíl hodnot polohy kuličky. Ve snaze dostat kuličku na požadovanou pozici je provedeno naklonění plošiny. V algoritmu zastává funkci PID regulátoru blok PIDU. Blok umožňuje přepnutí do manuálního režimu, který je dále využit ve vizualizaci.



Obrázek 27 - Implementace regulace hlavní smyčky (obě osy)

V algoritmu hlavní smyčky je implementováno čtení dat kamery z RAM paměti RPi. Data jsou v rozsahu od 0 do 120. Krajních hodnoty se nevyskytují, střed kuličky se ke kraji nemůže dostat, je to dáno velikostí kuličky. Souřadnice obou os jsou funkcí LIN přepočítány do rozsahu od -1 do 1. Nulová pozice se tak nachází ve středu plošiny.

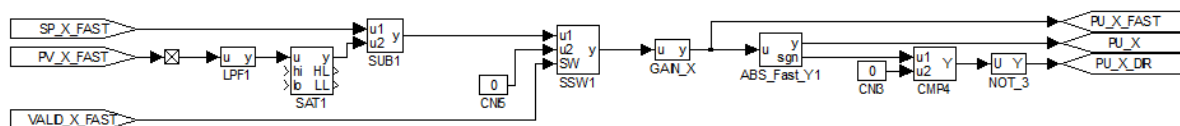


Obrázek 28 - Čtení dat z paměti RAM

4.2.2 Rychlá smyčka

Regulace rychlé smyčky probíhá na základě zpětné vazby z inklinometru. Vstupem do smyčky je hodnota naklonění ve stupních, regulátor následně reaguje a nakloní plošinu na požadovanou hodnotu. Regulátor tvoří proporcionální konstanta, jejíž hodnotu je možné měnit z prostředí vizualizace. Výstupem regulátoru je i záporná hodnota rychlosti, udávající směr rotace motoru. Znaménko bylo odděleno a pomocí komparátoru je generován signál směru.

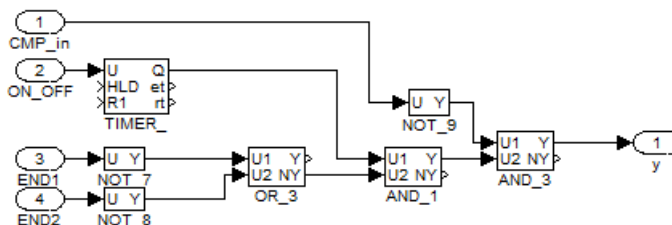
Při testování byl ke smyčce přidán blok LPF (dolní propust), který pomáhá zmírnit šum na datech z inklinometru. Mezní frekvence tohoto filtru byla nastavena na 50 Hz a konstanta tlumení na 1.



Obrázek 29 - Implementace regulace rychlé smyčky (jedna osa)

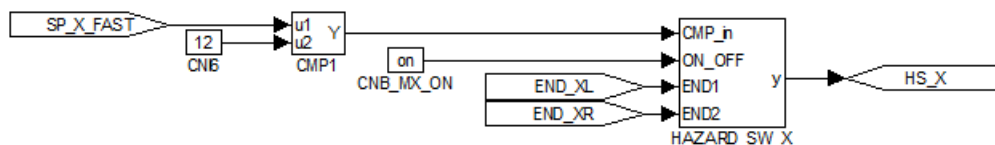
4.2.3 Hazard switch

Jedná se o blok s logickou strukturou pro zastavení motoru. V případě že plošina dojde na koncovou pozici a sepne spínač, dojde na dané ose k zastavení motoru. K zastavení dochází odpojením napájení U-F převodníku, žádný řídicí signál tak není generován. V bloku HAZARD_SW bylo pro potřeby testování umístěno manuální zapínání motoru (převodníku) a už tam zůstalo. Dále k zastavení dochází, pokud vstup podmínky v log. 1.



Obrázek 30 - Vnitřní zapojení bloku HAZARD_SW

Podmínka je připojena k bloku na příslušný vstup a hlídá stav, kdy by se požadovaná hodnota náklonu vyskytovala nad limitací plošiny.



Obrázek 31 - Zapojení bloku HAZARD_SW (osa X)

4.2.4 Čtení dat z inklinometru

Inklinometr je připojen na analogové vstupy, které jsou čteny AD převodníkem s rozlišovací schopností 10 bitů a referenčním napětím 5 V. Číslo po převodu se nachází v rozsahu od 0 po 1024 a vyjadřuje hodnotu napětí na vstupu od 0 po 5 V. Získaná hodnota po převodu je upravena rovnicí, aby vyjadřovala skutečnou hodnotu napětí na vstupu.

$$u = A_{in} * \frac{5}{1024} \quad (4.1)$$

Pro vyjádření skutečné hodnoty úhlu z napětí je použita rovnice odvozená z převodní charakteristiky inklinometru.

$$\varphi = k * u + b \quad (4.2)$$

Kde k vyjadřuje konstantu převodu a konstanta b hodnotu posunu úhlu. Úhel je posunut, jelikož kladná hodnota napětí vyjadřuje i záporný úhel.

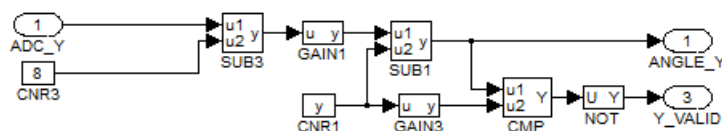
$$k = \frac{\Delta\varphi}{\Delta U} = \frac{50}{4} = 12,5 \quad (4.3)$$

$$b = \varphi_{max} - k * U_{max} = 25 - 12,5 * 4,5 = -31,25 \quad (4.4)$$

Po dosazení a úpravě je získána rovnice zpětného převodu:

$$\varphi = 0,061 * A_{in} - 31,25 \quad (4.5)$$

Rovnice je implementována v programu za výstup z analogového pinu do programového bloku AXIS_CONVERT. V tomto bloku se také nachází kalibrační konstanty a podmínka určující platnost dat. Kalibrační konstanty byly zvoleny při kalibraci plošiny pomocí vodováhy.



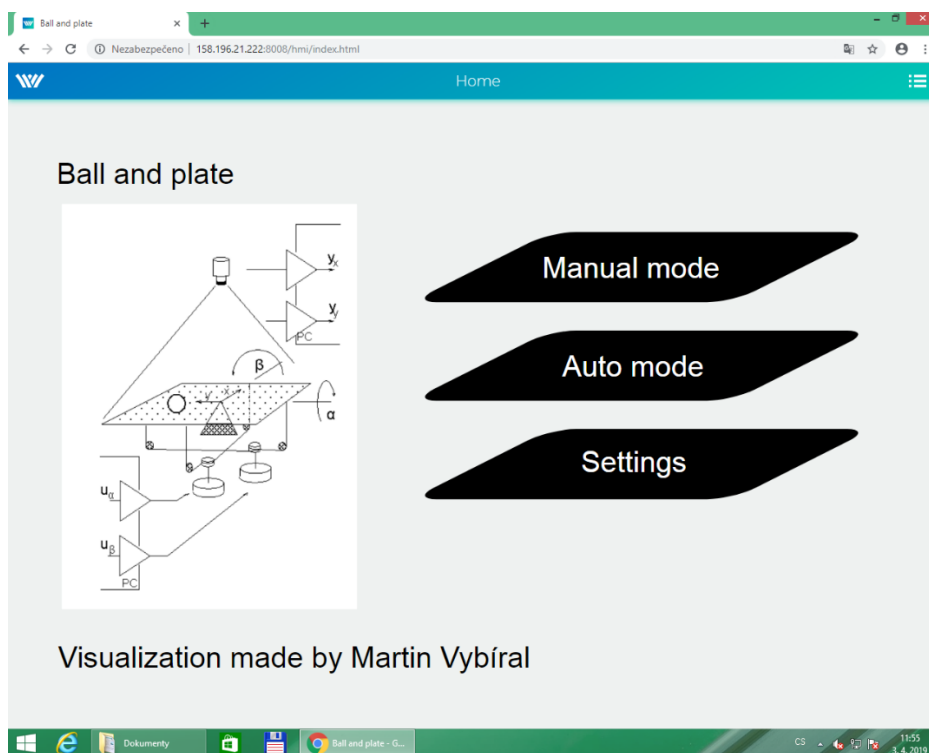
Obrázek 32 - Převod napětí na úhel v bloku AXIS_CONVERT

5 Vizualizace

Pro vytvoření vizualizace byl vybrán program RexHMI Designer, který je součástí REXYGEN Studia. Jedná se o program vycházející z grafického editoru Inkscape s již přidanou knihovnou ovládacích prvků. Prvky je možno umisťovat libovolně do vyznačené plochy stránky. Výstupem z editoru je soubor formátu SVG, který se následně kompiluje na HTML stránku s připojenými knihovnami CSS, nebo JavaScriptu. Vizualizace je kompilována a zároveň nahrána do RPi pomocí programového bloku "HMI" při nahrávání exekutivy. Vizualizace jako WEB server je spuštěna přímo na RPi a je možné se na ni v rámci sítě připojit. [10]

Celá vizualizace se skládá ze čtyř HTML stránek:

- Home – úvodní stránka
- Manual – stránka s manuálním módem
- Auto – stránka s automatickým módem
- Settings – stránka s nastavením parametrů regulace

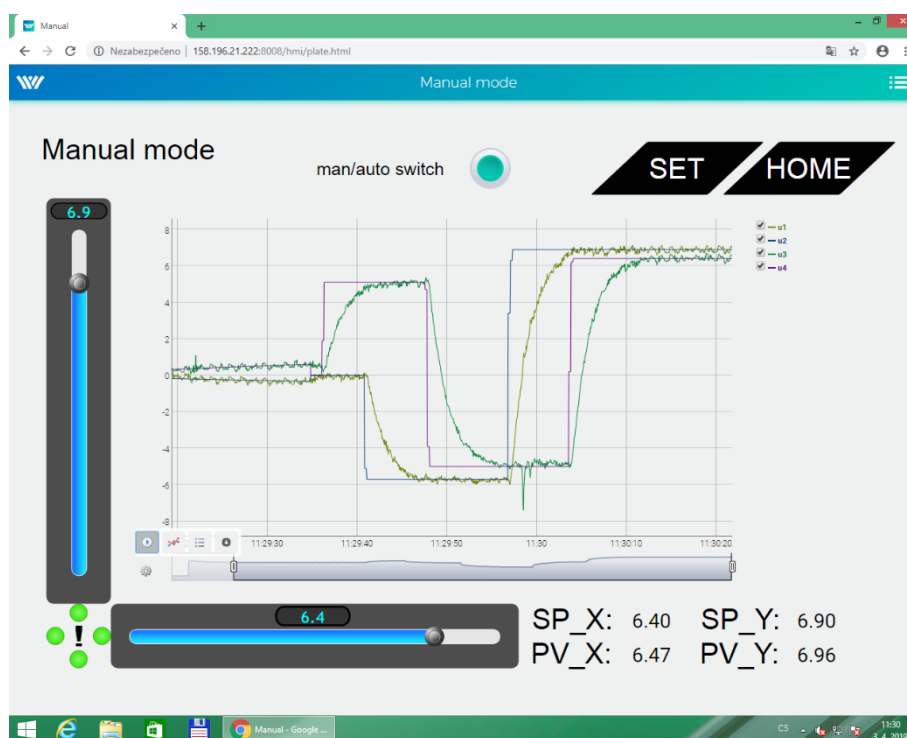


Obrázek 33 - Úvodní stránka

Při zapnutí vizualizace se první zobrazí úvodní stránka, ze které je následně možno přistupovat k ostatním. Mezi stránkami lze poté intuitivně přepínat díky navigačním tlačítkům, která jsou umístěna na každé stránce v pravém horním rohu.

První tlačítko odkazuje na stránku s Manuálním módem. Na této stránce je umožněno sledovat regulovanou veličinu náklonu a pracovat s rychlou regulační smyčkou. Samotné přepnutí stránky nepřepíná regulátor, pro přepnutí do manuálního módu je nutno použít funkční tlačítko nacházející se nad grafem. Opětovným stiskem dochází k přepnutí regulátoru zpět do automatického režimu.

Hlavními ovládacími prvky jsou dva posuvníky, pro osu X umístěn horizontálně, pro osu Y vertikálně. Posuvníky jsou nastaveny na zadávání veličiny od -10° do $+10^\circ$ s přesností desetiny stupně. Uprostřed obrazovky se nachází graf sledovaných hodnot. Pro obě osy je sledována požadovaná hodnota naklonění a hodnota stavová. Aktuální hodnoty lze vidět na indikátorech v pravém dolním rohu. Indikace koncových spínačů se nachází v levém dolním rohu, jedná se o čtyři kontrolky, které jsou umístěny okolo symbolu vykřičníku. Každá kontrolka indikuje stav jednoho spínače, pokud je vše v pořádku, svítí zelenou barvou, pokud se plošina nachází v krajní poloze, tedy mimo meze, rozsvítí se příslušná kontrolka červeně.

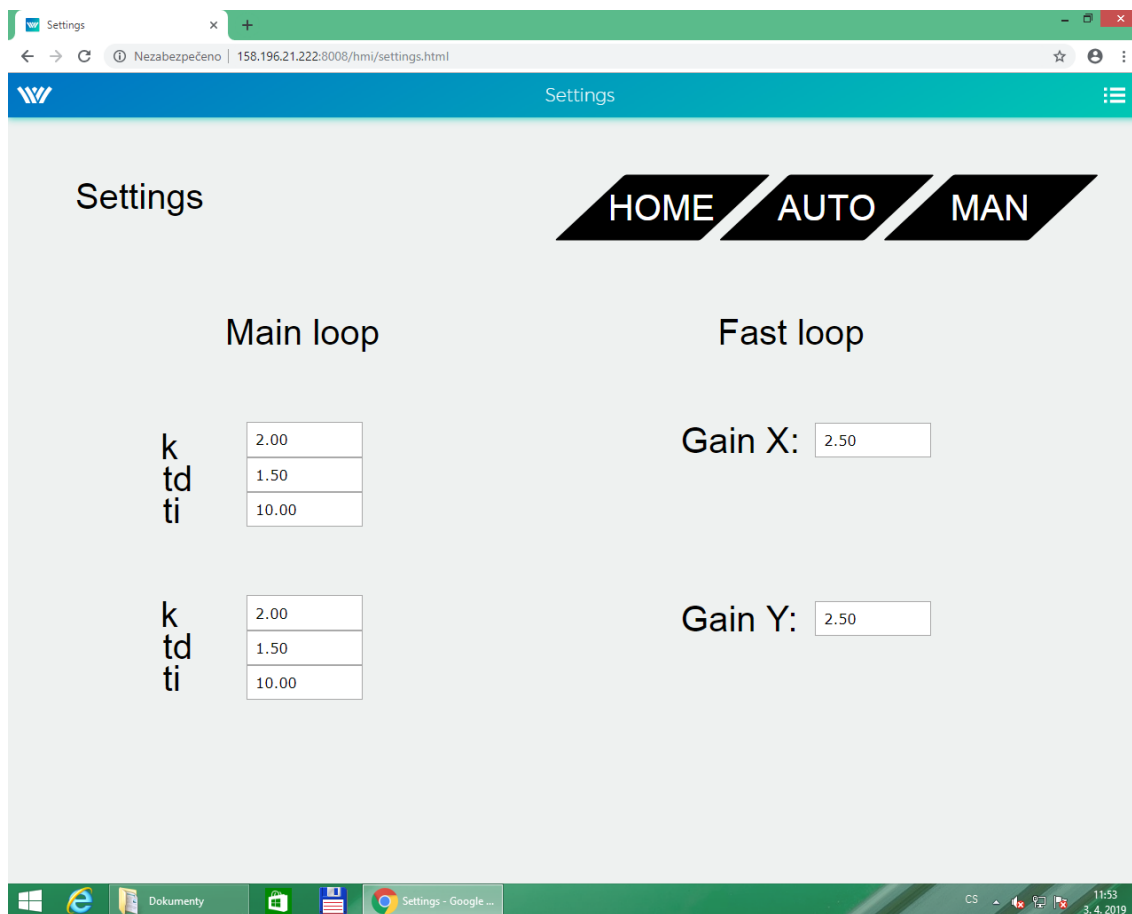


Obrázek 34 - Manuální mód

Další stránka vizualizuje automatický mód, ten již pracuje s polohou kuličky. Vzhledově stránka vychází ze stránky předešlé, liší se pouze v názvu a funkci. Opět se zde nachází tlačítko na přepínání

módu, umístěno na stejném místě. Graf nyní zobrazuje pozici kuličky. Posuvníky mají potřebně upraveny meze od -1 do 1.

Poslední stránkou je nastavení. Tato stránka umožní uživateli kdykoli za chodu měnit parametry regulátoru. Rozdělena je do dvou částí, regulátor rychlé a hlavní smyčky. Výchozí hodnoty jsou uloženy v kódu a do vizualizace se načítají. Prvky jsou napojeny přes zvolený alias s proměnnými v kódu.



Obrázek 35 - Nastavení regulátorů

Vizualizace je spustitelná v běžném webovém prohlížeči, a to přímo na platformě, nebo vzdáleně na místní síti. Pro připojení je potřeba zadat do prohlížeče adresu ve tvaru: `http://IP:port/`. Webová služba běží na portu 8008. Konkrétní IP adresa zařízení ve školní síti byla zvolena na 158.196.21.222.

Přihlášení k HMI:

Uživatel: admin

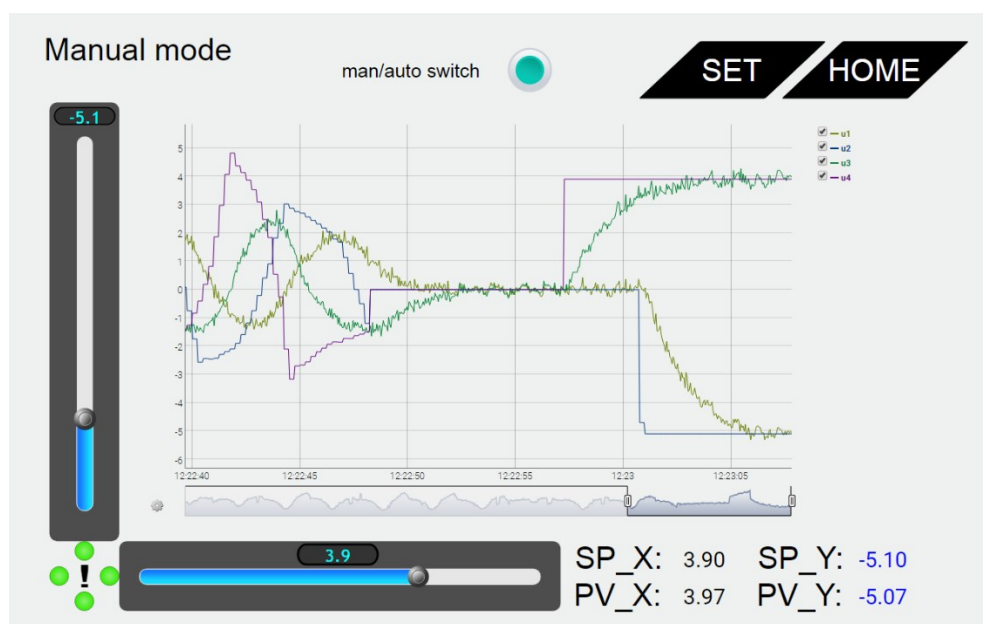
Bez hesla

6 Testování

V rámci testování byl odzkoušen provoz modelu při normálních podmínkách. Především zapojení bylo odzkoušeno na nepájivém poli, kde byly drátově zapojeny obvody podle uvedených schémat v kapitole 3. Zapojení bylo odzkoušeno bez regulace a zjistilo se, že změna rychlosti i směru naklání plošiny je funkční. Při testování různých rychlostí bylo zjištěno, že dochází na plošině k vibracím. Vibrace byly nejsilnější při středních rychlostech naklání.

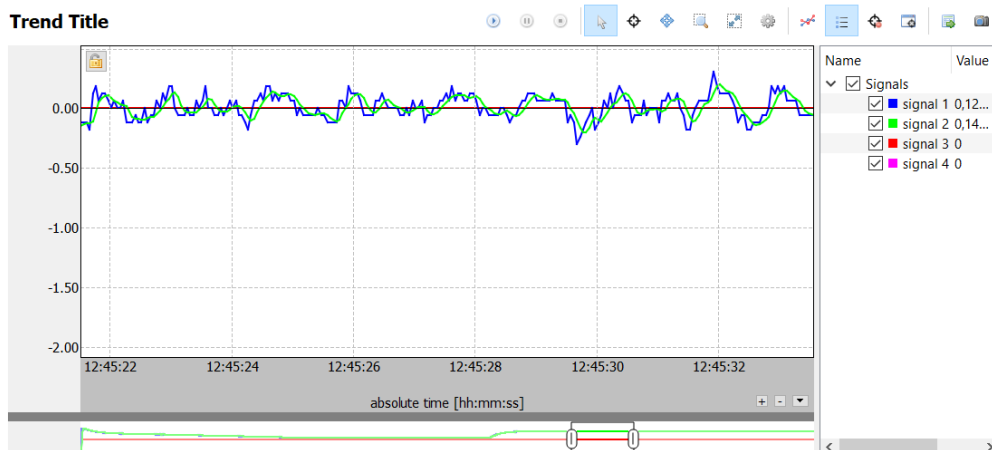
Nové zapojení dle předpokladu negenerovalo tak silné vibrace. Vibrace se projevovaly s nízkou intenzitou, a to pouze při nízkých rychlostech. Tyto nově zaznamenané vibrace jsou dány vlastnostmi krokových motorů.

Snímek obrazovky (Obrázek 36) byl pořízen při testování a zachycuje chování regulace rychlé smyčky. V grafu v čase 12:22:48 došlo k přepnutí režimu regulace hlavní smyčky na manuální mód. V tento okamžik začíná reagovat regulace rychlé smyčky a změnila náklon plošiny na 0° (posuvníky byly nastaveny na nulové pozici). V dalších okamžicích byly provedeny změny požadované hodnoty náklonu na obou osách (nastavením posuvníku do vyobrazené hodnoty), náklon plošiny se mění a po dosažení požadované hodnoty zůstává plošina nakloněna.



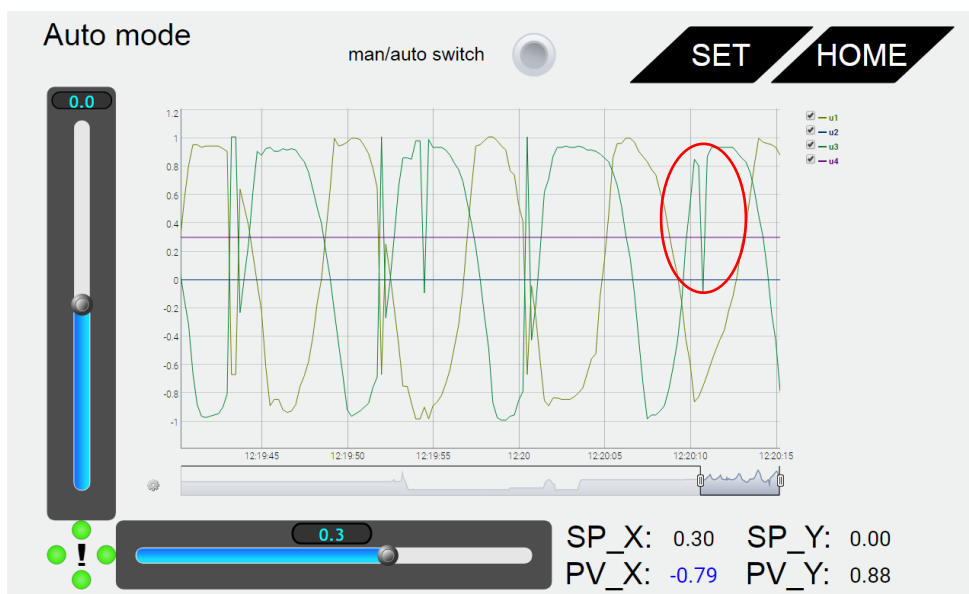
Obrázek 36 – Testování manuálního módu

Z pozorování grafu byla zjištěna existence šumu na výstupu z inklinometru. Hodnoty šumu jsou v toleranci katalogového listu výrobce. Při pohybu plošiny se silnějšími vibracemi je šum na inklinometru silnější. Kvůli této skutečnosti byl do algoritmu přidán filtr typu dolní propust s mezní frekvencí 50 Hz. Filtr vyhlazuje špičky zašuměného signálu (Obrázek 37: signal 1), výsledná amplituda šumu je tak menší (Obrázek 37: signal 2).



Obrázek 37 -Průběhy výstupu inklinometru před a po filtraci

Testování automatického módu zobrazuje následující snímek obrazovky (Obrázek 38). V grafu lze pozorovat aktuální polohu detekované kuličky (u1, u3) a požadovanou hodnotu polohy (u2, u4). Při pozorování bylo zjištěno, že se v průběhu hodnoty aktuální polohy kuličky vyskytuje chyba (označena červenou elipsou). Chyba se v průběhu sledované veličiny často opakuje.



Obrázek 38 - Testování automatického módu

Závěr

Cílem práce bylo analyzovat původní stav modelu, zprovoznit jej a inovovat. Při analýze modelu byly zjištěny skutečnosti o HW struktuře modelu a jednotlivých prvcích. Ze zjištěných skutečností bylo obnoveno předešlé zapojení, odzkoušeny motory a detekce kuličky.

Program pro detekování kuličky byl upraven a zprovozněn na Raspberry Pi. Program zapisuje hodnoty kuličky přibližně s periodou 100 ms. Zrychlení programu je možné omezením vizualizace dat z kamery. V datech se občas vyskytuje chybová hodnota, která může být způsobena detekcí odlesku plošiny.

Při testování obnoveného modelu, bylo zjištěno, že dochází na plošině k vibracím. Vibrace byly způsobovány PNM modulací a nejsilnější byly při středních rychlostech pohybu. Proto jako jedna z inovací byla provedena výměna rozhraní mezi Rexduinem a drivery motorů. Nové rozhraní obsahuje U-F převodník, který eliminuje chyby PNM modulace. Převodník pracuje jako generátor obdélníkového signálu a neexistuje u něj časové okno, ve kterém by se plošina chvíli pohybovala a chvíli stála. Další výhodou je zvýšení počtu rychlostí a to z 16 na 60.

Další úpravou modelu bylo přidání inklinometru a možnosti řídit plošinu podle úhlu naklonění. V REXYGENU byla vytvořena rychlá regulační smyčka, která na základě dat z inklinometru řídí rychlost motoru. Maximální úhel náklonu byl omezen na $\pm 10^\circ$, aby nedocházelo k náklonu plošiny do limitní polohy.

S novým HW přibyl požadavek na výrobu DPS, kterou se podařilo navrhnout a vyrobit jako Arduino shield. Samotná výroba desky proběhla bez problému. DPS nyní spojuje Rexduino s drivery, inklinometrem a koncovými spínači, vše je kompaktní a přehledné.

Řízení modelu bylo implementováno do systému REXYGEN a je děleno do dvou úloh. Obě úlohy jsou funkční a napojeny na vizualizaci. Z vizualizace je možno měnit parametry regulátorů a nastavovat požadovanou hodnotu automatického i manuálního módu. Konstanty regulátoru byly nastaveny experimentálně, syntéza regulátoru u tohoto inovovaného modelu kuličky na plošině nebyla součástí této práce.

Vizualizace byla vytvořena v RexHMI Designeru a nahrána na platformu, kde běží jako web server. K tomuto serveru je možné se připojit pouze v rámci místní sítě, případně je možné vizualizaci spustit na platformě Raspberry Pi v prohlížeči.

Použitá literatura

- [1] REXYGEN [online]. 2019 [cit. 2019-04-28]. REX CONTROLS S.R.O. Dostupné z: www.rexygen.com
- [2] *Getting started with REXYGEN and Raspberry Pi: User guide* [online]. REX CONTROLS S.R.O. 20. 04. 2019 [cit. 2019-04-28]. 10649. Dostupné z: https://www.rexygen.com/doc/ENGLISH/MANUALS/RexygenGettingStarted_RasPi/RexygenGettingStarted_RasPi_ENG.html
- [3] *CE 151 kulička na ploše* [online]. HUMUSOFT S.R.O. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.humusoft.cz/models/ce151/>
- [4] Danaher Corporation [online katalogový list]. 430t_driver. ©2004 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: http://www.portalnaukowy.edu.pl/allegro/430t_driver.pdf
- [5] CHAVANCE, Florian. Design and implementation of control algorithms: For educational control systems. 17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava, 2015. Technical Report. VŠB - Technical University of Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí práce Štěpán OZANA.
- [6] *Raspberry Pi remote connection using Xming and putty* [online]. 23 Jan 2015 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://raspberrypi.stackexchange.com/questions/27038/raspberry-pi-remote-connection-using-xming-and-putty>
- [7] *Raspberry Pi Camera Module* [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/documentation/raspbian/applications/camera.md>
- [8] *Linux commands* [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/documentation/linux/usage/commands.md>
- [9] *OpenCV. Releases* [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://opencv.org/releases/>
- [10] *Web-based HMI for REXYGEN: User guide* [online]. REX CONTROLS S.R.O. Plzeň, 20. 04. 2019 [cit. 2019-04-28]. 10649. Dostupné z: https://www.rexygen.com/doc/ENGLISH/MANUALS/RexHMI/RexHMI_ENG.html
- [11] Introduction [online]. ARDUINO. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/guide/introduction>
- [12] Dokonalé spojení Raspberry Pi a mikrokontroléru Arduino [online]. REX CONTROLS S.R.O. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.rexcontrols.cz/clanky/dokonale-spojени-raspberry-pi-a-mikrokontroleru-ar>
- [13] Raspberry Pi 2 Model B [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-2-model-b/>
- [14] Raspberry Pi [online]. 28 April 2019 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi

- [15] MEASUREMENT SPECIALTIES, INC. [online katalogový list]. DOG2 MEMS SERIES VOLTAGE INCLINOMETER. ©2017 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FDOG2_MEMS-Series_Inclinometer%7FA4%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_DOG2_MEMS-Series_Inclinometer_A4.pdf%7FCAT-TSI0007
- [16] INCHANGE Semiconductor [online katalogový list]. LM7812. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://datasheet.octopart.com/LM7812-Inchange-Semiconductor-datasheet-15981488.pdf>
- [17] Analog Devices, Inc. [online katalogový list]. AD654. ©2013 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://datasheet.octopart.com/LM7812-Inchange-Semiconductor-datasheet-15981488.pdf>
- [18] PAVELKA, Michal. Řízení systému se CCD kamerou. Brno, 2000. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a informatiky.

Seznam příloh

Součástí BP je DVD.

Adresářová struktura přiloženého DVD:

- A_DPS – Schéma a DPS nového rozhraní
- B_PYTHON – Program pro sledování polohy kuličky
- C_REX – Řídicí program a vizualizace